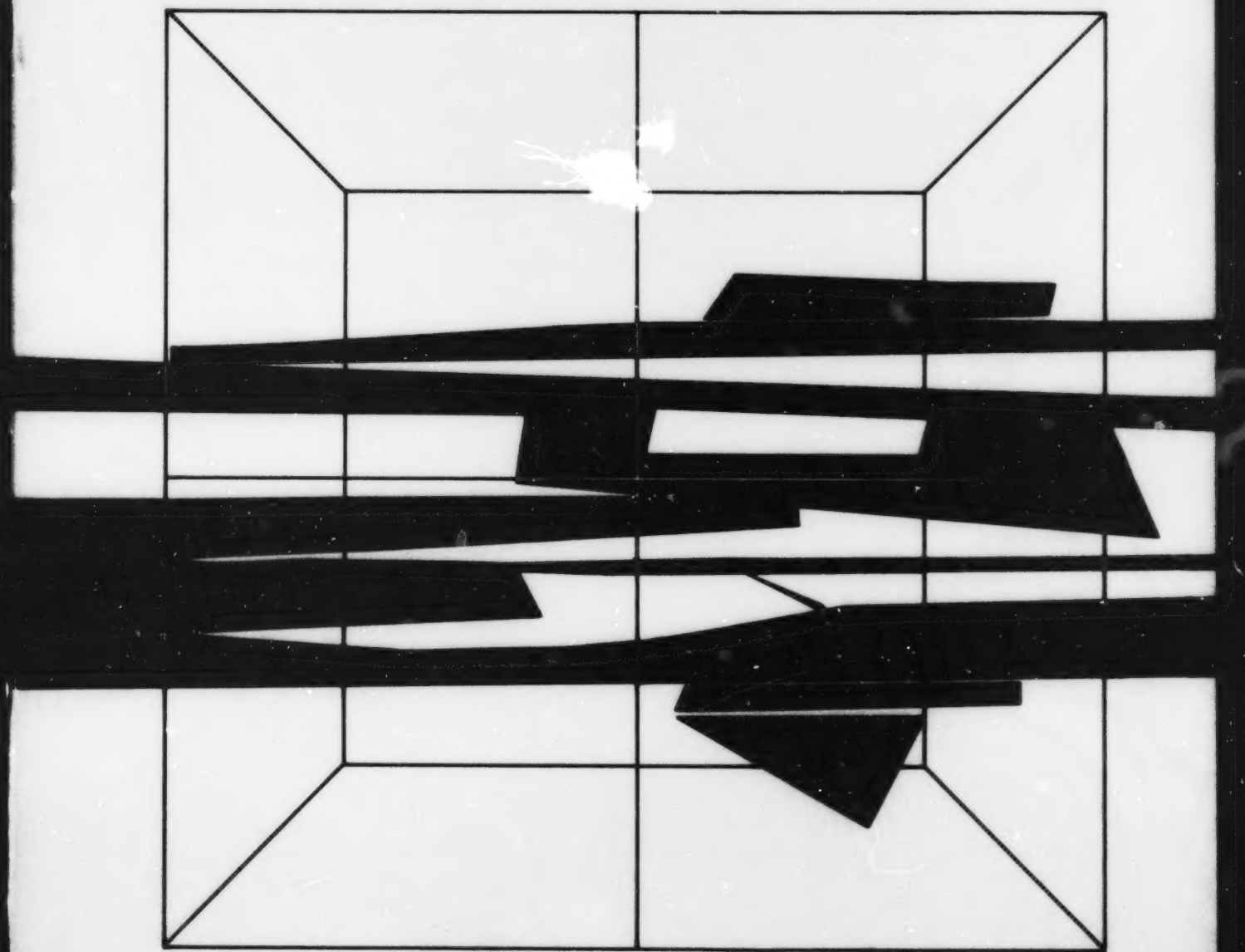
Élimination du radium-226 des effluents des mines d'uranium

Rapport final d'un programme mixte gouvernement-industrie

1885
1985

Rapport SPE 3/HA/3
Décembre 1984



Environnement Canada
Service de la protection de l'environnement

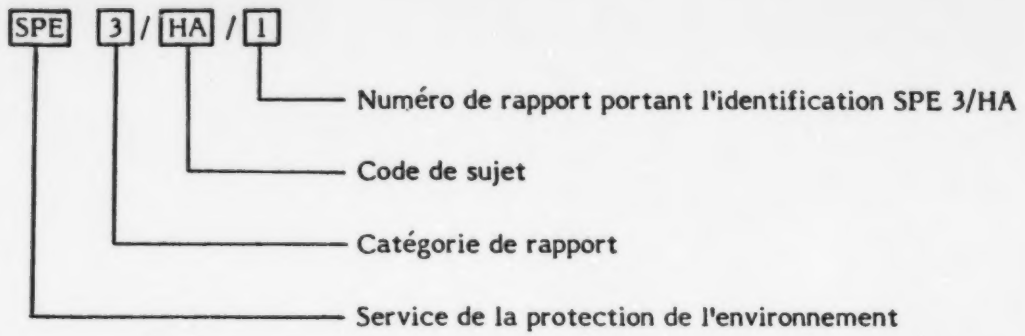
Environment Canada
Environmental Protection Service

Canada

85-3995/

RAPPORTS DU SERVICE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Exemple de numérotage:



Catégories

1	Règlements/Lignes directrices/ Codes de procédure
2	Consultation publique: évaluation des problèmes, options de contrôle
3	Recherche et développement technologique
4	Revues de la documentation
5	Relevés
6	Évaluations des impacts sur l'environnement
7	Surveillance
8	Propositions, analyses et énoncés de principes généraux
9	Guides

Sujets

AG	Agriculture
AP	Polluants atmosphériques
CC	Produits chimiques commerciaux
CP	Pollution - consommateurs
FP	Traitement des aliments
HA	Déchets dangereux
IC	Chimie inorganique
MA	Pollution marine
MM	Exploitation minière et traitement des minéraux
NR	Régions du Nord
PF	Papier et fibres
PG	Production de l'électricité
PN	Pétrole et gaz naturel
SP	Déversements de pétrole et de produits chimiques
SRM	Méthode de référence normalisée
TS	Systèmes de transport
UP	Pollution urbaine

Sujets et codes additionels sont introduits au besoin. Une liste de rapports du SPE peut être obtenue en s'adressant à la Section des publications, Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, Ottawa (Ontario) K1A 1C8.

Centenaire des parcs nationaux
1885
1985
National Parks Centennial

1885–1985: 100 ans de conservation du patrimoine
Le premier parc national du Canada a été aménagé en 1885, à Banff en Alberta. Aujourd'hui il y a des parcs nationaux et des parcs historiques nationaux dans chaque province et territoire. Le centenaire des parcs nationaux représente l'occasion de réaffirmer le désir de préserver notre patrimoine au profit de tous les Canadiens.

ÉLIMINATION DU RADIUM-226 DES EFFLUENTS DES MINES D'URANIUM

Rapport final d'un programme mixte gouvernment-industrie

D.W. Averill
D. Moffett
R.T. Webber
L. Whittle
J.A. Wood

Environnement Canada
Service de la protection de l'environnement
Rapport SPE 3/HA/3
Décember 1984

Publication
distribuée par le Service des publications,
Service de la protection de l'environnement
Environnement Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 1C8

English copy available at the above mentioned address

Édition française de
Removal of Radium-226 from Uranium Mining Effluents
préparée par le Module d'édition française

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1985
N° de cat. En 49-4/3-3F
ISBN 0-662-93016-9
IMPRIMERIE BEAUREGARD LIMITÉE

PRÉFACE

Un programme intensif de mise au point d'un procédé d'élimination du radium-226 des effluents des mines d'uranium a été entrepris par des représentants du gouvernement canadien et des entreprises exploitant l'uranium au Canada entre 1978 et 1980. L'un des ojectifs implicites était la diffusion des résultats obtenus. Pour documenter complètement le programme de recherche, trois volumes ont été préparés: le Volume I résume les résultats du programme; le Volume II contient le texte complet; le Volume III rassemble toutes les annexes. Le présent rapport est le Volume I. On peut se procurer les Volumes II et III en s'adressant à:

Environnement Canada
Service de la protection de l'environnement
Centre technique des eaux usées
C.P. 5050
Burlington (Ontario)
L7R 4A6

PREFACE

An intensive process development program for the removal of radium-226 from uranium mining effluents was undertaken jointly by representatives of the Government of Canada and the Canadian Uranium Mining Industry between 1978 and 1980. One of the implicit objectives was the dissemination of the information developed. To ensure complete documentation of the program, this information has been compiled in three volumes: Volume I summarizes the results of the program; Volume II provides the complete text; and Volume III consists of appendices. Volume I is reproduced in this report. Volumes II and III may be obtained from:

Environment Canada
Environmental Protection Service
Wastewater Technology Centre
P.O. Box 5050
Burlington, Ontario
L7R 4A6

REMERCIEMENTS

Ce programme n'aurait pas été possible sans la collaboration de représentants du gouvernement et de l'industrie. Les noms des membres du groupe de gestion et du groupe de travail technique figurent ci-dessous. Les conseillers et experts-conseils dans le domaine technique étaient le M. P. Huck, actuellement à l'université de l'Alberta (sous contrat); M. H. Campbell, Environnement Canada; M. T. Constable, Environnement Canada; M. J. Skeaff, Énergie, Mines et Ressources Canada; IEC Beak Consultants Inc. (sous contrat); MacLaren Engineers, Planners & Scientists Inc. (sous contrat); CANVIRO Consultants Limited (sous contrat); M. R. Durham, retraité d'Environnement Canada; M. R. Utting, Commission de contrôle de l'énergie atomique. Nous remercions également M. J.W. Schmidt et M. A. Zaidi, d'Environnement Canada d'avoir contribué à la préparation du résumé. Il existe plusieurs autres personnes que nous aimerions remercier, mais le manque d'espace nous empêche de le faire.

MEMBRES DU GROUPE DE GESTION ET DU GROUPE DE TRAVAIL TECHNIQUE

Groupe de gestion	
M. J. Schmidt	Environnement Canada (président)
M. E. Barnes	Rio Algom Limited
M. E. Larocque	Denison Mines Limited
Dr A. Ashbrook	Eldorado Ressources Limitée[1]
Dr. J. Coady	Commission de contrôle de l'énergie atomique
M. J. Scott	Environnement Canada
M. W. Craigen[2]	Énergie, Mines et Ressources Canada
M. P. Kresin	Madawaska Mines Limited
M. A. Morrish	Gulf Minerals Canada Limited
M. P. Fournier	Amok Limited
M. M. Neven[3]	Key Lake Mining Corporation
Groupe de travail technique	
M. D. Averill	Environnement Canada (président)
Dr. D. Moffett[4]	Rio Algom Limited
M. R. Webber	Denison Mines Limited
M. R. McClure[5]	Eldorado Ressources Limitée

[1] Anciennement Eldorado Nucléaire Limitée.
[2] Anciennement représenté par M. G. Herget.
[3] Anciennement représenté par B. Rosner, Uranerz Exploration and Mining Limited.
[4] Maintenant avec Eldorado Ressources Limitée.
[5] Anciennement représenté par M. V. Lakshmanan (1978) et M. G. Kazakhian (1979).

TABLE DES MATIÈRES

	PRÉFACE	III
	REMERCIEMENTS	IV
	LISTE DES FIGURES	VI
	LISTE DES TABLEAUX	VII
1	**INTRODUCTION**	1
2	**PROGRAMME EXPÉRIMENTAL**	3
2.1	Traitement de l'effluent	3
2.2	Traitement des boues	5
3	**RÉSULTATS**	7
3.1	Coprécipitation du baryum et du radium	7
3.2	Coagulation, floculation et clarification	9
3.3	Filtration	9
3.4	Caractérisation et essorage des boues	16
4	**DISCUSSION**	18
4.1	Coprécipitation du baryum et du radium	18
4.2	Filtration	18
5	**ÉVALUATION DES COÛTS**	20
5.1	Évaluation des investissements	20
5.2	Estimation des frais d'exploitation et d'entretien	20
5.3	Estimation du coût total	20
6	**CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS**	26
6.1	Conclusions	26
6.2	Recommandations	26
	BIBLIOGRAPHIE	28

LISTE DES FIGURES

1 Calendrier du programme 4

2 Procédés de traitement des effluents 4

3 Vue en plan de l'usine-pilote 6

4 Performance du système de coprécipitation du beryum et du radium dans l'unité-pilote 8

5 Performance de la coprécipitation: phase de démonstration 10

6 Filtre bicouche 12

7 Résultats des démonstrations sur filtre bicouche 13

8 Performance typique d'un filtre bicouche 17

9 Procédé d'élimination du radium-226 19

10 Schéma simplifié du procédé 21

11 Schémas simplifiés des circuits auxiliaires 22

12 Plan d'une usine 23

LISTE DES TABLEAUX

1.1 Participants au programme mixte gouvernement-industrie 22

2.2 Objectifs du programme mixte gouvernement-industrie 33

3.3 Caractéristiques de l'effluent du bassin de retenue des résidus 55

4.4 Conditions d'exploitation d'un filtre bicouche 114

5.5 Base de données pour la conception d'une installation 119

6.6 Résumé de l'estimation des investissements – usine de 380 l/s 124

7.7 Résumé de l'estimation des frais d'exploitation et d'entretien – usine de 380 l/s 128

1 INTRODUCTION

L'extraction et le traitement du minerai d'uranium produisent habituellement de grandes quantités de déchets solides et liquides. Une boue, constituée principalement de gangue et de solutions chimiques ayant servi au traitement, est déversée dans des bassins de retenue des résidus. Les matières solides se déposent et laissent un liquide limpide qui contient de nombreuses matières dissoutes. Sous les climats tempérés, où les précipitations sont plus importantes que l'évaporation, il est nécessaire de déverser cet effluent liquide dans les cours d'eau locaux.

La plupart des matières radioactives dissoutes présentes dans les boues résiduaires sont précipitées par addition de chaux ou de calcaire avant que l'effluent ne quitte l'usine. Toutefois, le radium-226, un radio-isotope dont l'activité demeure relativement élevée dans les effluents des bassins de retenue des résidus, est toxique pour l'homme et, pour cette raison, est une cause particulière de préoccupation. Tous les effluents liquides résultant de l'extraction et du traitement du minerai d'uranium doivent donc être traités pour éliminer le radium-226 avant d'être déversés dans l'environnement.

Au Canada, le radium-226 est éliminé par addition de chlorure de baryum qui provoque la précipitation de sulfate de baryum et de radium [(Ba, Ra)SO_4]. Le procédé, que l'on utilise depuis 1968, consiste habituellement à mélanger une solution de chlorure de baryum avec l'effluent du bassin de retenue des résidus dans une conduite ou un canal ouvert, après quoi on sépare les matières solides des liquides dans de grands bassins de décantation. Pour améliorer la décantation, on ajoute parfois du sulfate ferrique ou ferreux comme coagulant. Même si généralement ce procédé abaisse de façon notable l'activité du radium-226 dissous, il a cependant deux inconvénients liés d'une part au radium-226 en suspension dans les effluents et d'autre part à l'élimination des boues de (Ba, Ra)SO_4. Le sulfate de baryum et de radium est un solide cristallin très fin qui sédimente lentement et que l'on n'élimine pas facilement dans de simples systèmes de décantation. Dépendant de la taille des bassins, les facteurs hydrologiques de l'installation et de l'emploi ou non coagulants, des quantités appréciables de radium-226 particulaire peuvent demeurer dans les effluents. Le deuxième problème, c'est la récupération du produit précipité pour en disposer de façon définitive (AIEA, 1976).

Sous les auspices d'Environnement Canada, un groupe de travail constitué de représentants du gouvernement et du secteur minier a constitué en 1974 un sous-groupe sur la radioactivité, pour aider à préparer des directives et des règlements relatifs aux effluents des mines d'uranium. Le groupe a soumis plusieurs recommandations de recherches supplémentaires (sous-groupe de la radioactivité, 1974). En ce qui concerne le radium, il recommandait d'étudier des méthodes d'enlèvement plus efficaces, notamment la mise au point de systèmes de traitement mécaniques plus efficaces que les bassins de décantation. Suite à ces recommandations et à des constatations antérieures, le Centre technique des eaux usées d'Environnement Canada a entamé une étude de laboratoire en mars 1976. L'étude visait à évaluer le recours à la précipitation, à la coagulation, à la floculation et à la sédimentation pour éliminer le radium-226. En 1977, l'étude a été accélérée avec l'aide financière de la Commission de contrôle de l'énergie atomique. Les résultats ont été concluants. Lors de traitements par lots en laboratoire avec du chlorure de baryum comme précipitant, et soit de l'alun soit du chlorure ferrique comme coagulant (Wilkinson et Cohen, 1977), on est parvenu à diminuer la quantité de radium dans les effluents. Vu les inquiétudes exprimées par le secteur minier et les organismes du gouvernement et en se basant sur cette première étude de faisabilité, on a proposé un programme plus complet de

développement et de démonstration du procédé en laboratoire et dans une unité-pilote. Ce programme a été administré et financé par le gouvernement et l'industrie comme l'indique le tableau 1. Les résultats de cette étude sont résumés dans le présent rapport.

TABLEAU 1 PARTICIPANTS AU PROGRAMME MIXTE GOUVERNEMENT-INDUSTRIE

	Membre du		Contribuant au			
Organisme	Groupe de gestion	Groupe de travail	Financement	Personnel usine-pilote	Services de laboratoire	Services sur place
AMOK Limited	*		*			
Commission de contrôle de l'énergie atomique	*		*			
Denison Mines Limited	*	*	*	*	*	*
Eldorado Nucléaire Limitée	*	*	*	*	*	*
The Elliot Lake Centre						*
Énergie, Mines et Ressources Canada	*		*			
Environnement Canada	*	*	*	*	*	*
Gulf Minerals Canada Limited	*					
Key Lake Mining Corporation	*		*			
Madawaska Mines Limited	*		*			
Rio Algom Limited	*	*	*	*	*	*

2 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

L'objectif général de ce programme mixte gouvernement-industrie était de développer et de démontrer la possibilité d'éliminer le radium-226 des effluents des bassins de retenue des usines de traitement de l'uranium par un procédé physico-chimique particulier. Plus précisément, le travail devait viser à optimiser la coprécipitation du baryum et du radium, la séparation solide-liquide et l'essorage des boues. Les objectifs fixés figurent au tableau 2. Le travail expérimental a commencé en janvier 1978, et le programme a été divisé en plusieurs étapes, échelonnées de la façon indiquée à la figure 1.

TABLEAU 2 OBJECTIFS DU PROGRAMME MIXTE GOUVERNEMENT-INDUSTRIE

1.	Développer, avec l'aide d'une unité-pilote, un procédé physico-chimique permettant de réduire la teneur en radium-226 des effluents des mines et des usines de traitement du minerai d'uranium.
2.	Démontrer, avec l'aide d'une unité-pilote, que l'on peut parvenir à une teneur raisonnable en radium-226 dans l'effluent [les valeurs cibles sont 0,37 Bq/l (10 pCi/l) de radium-226 total et 0,11 Bq/l (3 pCi/l) de radium-226 dissous].
3.	Créer une base de données pouvant servir à concevoir un système de traitement grandeur nature.
4.	Évaluer les diverses méthodes d'essorage des boues produites par le procédé physico-chimique.
5.	Créer une base de données pouvant servir à concevoir un système d'essorage des boues grandeur nature.
6.	Évaluer le coût d'un système réel grandeur nature de traitement physico-chimique et d'essorage des boues.

On a étudié deux procédés de traitement des effluents (figure 2). Tous les deux prévoyaient la coprécipitation du baryum et du radium dans des réacteurs munis d'agitateurs et placés en série. Dans un cas, la coprécipitation était suivie par un mélange rapide de coagulant chimique, la floculation dans des floculateurs mécaniques en série et une séparation solide-liquide dans un clarificateur. Le second procédé, comprenait aussi la coprécipitation du baryum et du radium, mais elle était suivie directement par une séparation solide-liquide par filtration sur un milieu granulaire avec adjuvant chimique.

2.1 Traitement de l'effluent

L'effluent utilisé au cours de ce programme provenait de la mine Quirke, appartenant à Rio Algom Limited, située près d'Elliot Lake (Ontario). Les caractéristiques de cet effluent sont résumées au tableau 3.

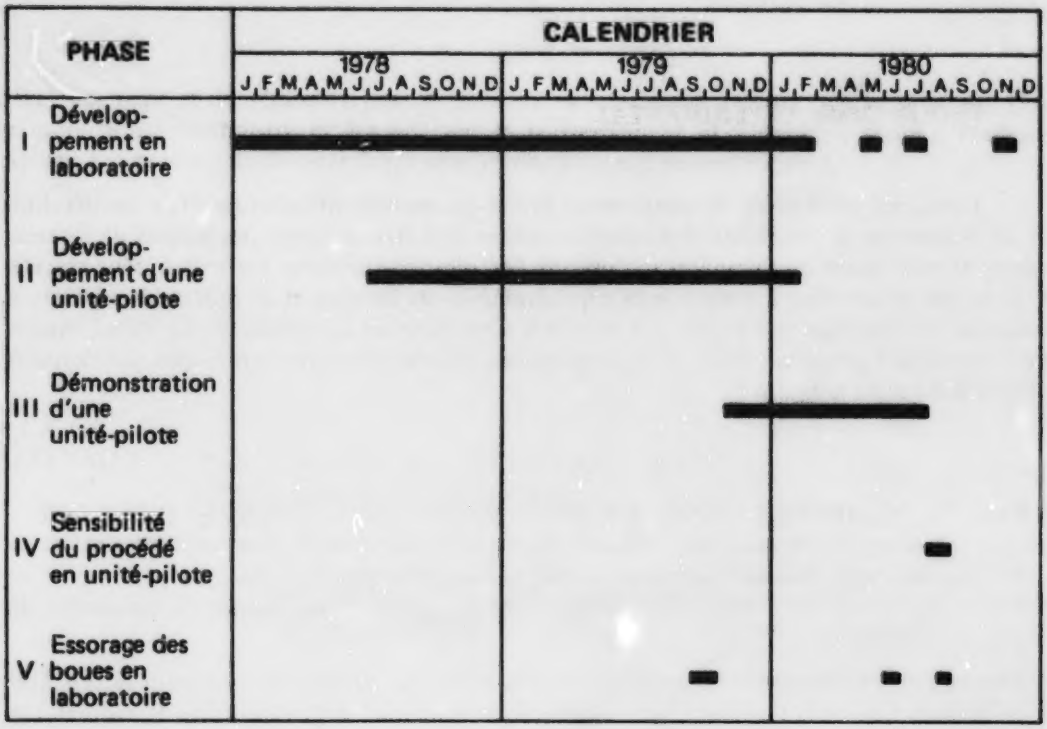


FIGURE 1 CALENDRIER DU PROGRAMME

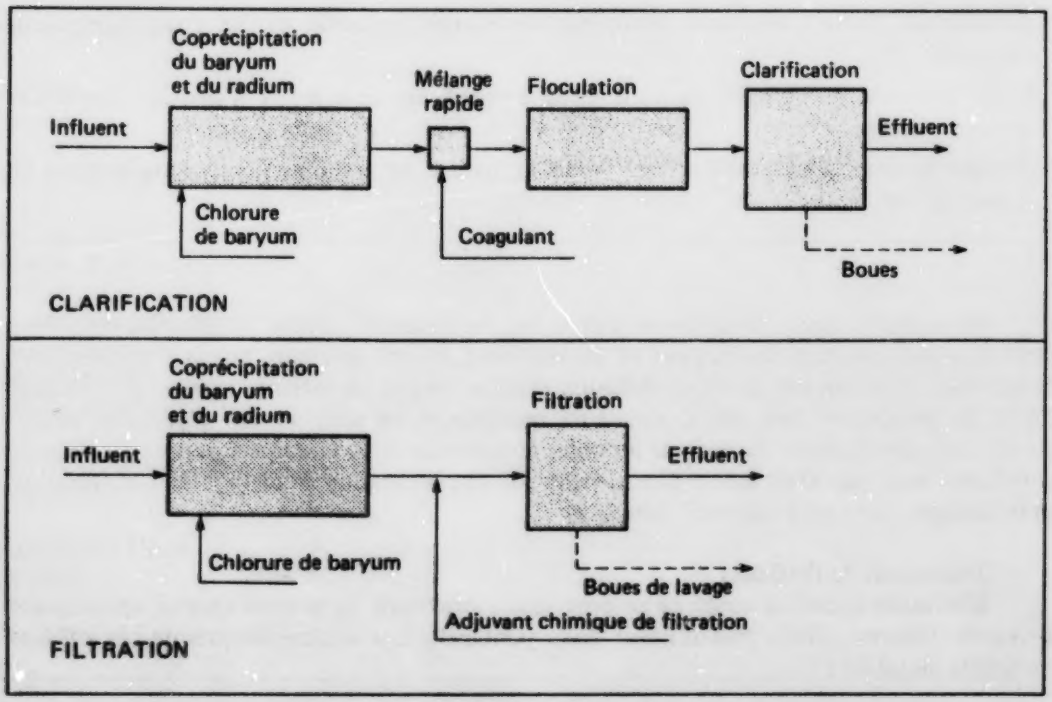


FIGURE 2 PROCÉDÉS DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS

TABLEAU 3 CARACTÉRISTIQUES DE L'EFFLUENT DU BASSIN DE RETENUE DES RÉSIDUS*

Paramètre	Valeur moyenne	Plage
Radium-226 total (Bq/l)	22,1	7,4 - 38,4
Radium-226 dissous** (Bq/l)	597	200 - 1038
(pCi/l)	19,7	6,0 - 34,3
pH	9,3	6,7 - 10,6
Sulfates (mg/l)	1187	490 - 1870
Alcalinité (exprimée en mg de $CaCO_3$/l)	108	27 - 200
Matières en suspension (mg/l)	≃ 2	< 2 - 36
Azote de nitrate (mg/l)	66,5	0,2 - 154
Azote ammoniacal (mg/l)	23,5	6,9 - 41

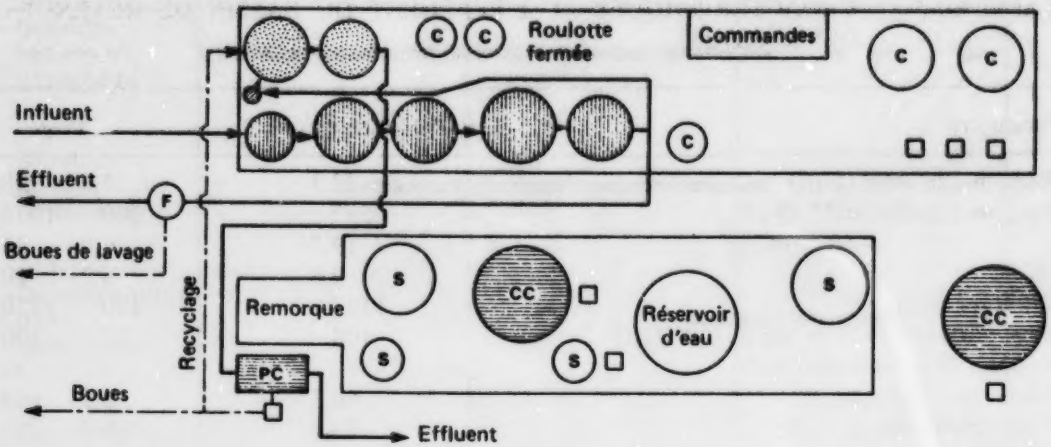
* Lots reçus au Centre technique des eaux usées, janvier 1978 à novembre 1979.
** Activité du radium-226 après passage sur membrane filtrante de 0,45 µm.

On a procédé à des essais par lots en laboratoire pour optimiser les variables du procédé. Par la suite, des essais en continu, toujours en laboratoire, ont permis de confirmer les résultats des essais par lots. Le programme d'essais en unité-pilote devait permettre de confirmer les résultats des expériences précédentes, de déterminer les problèmes relatifs au passage à l'échelle réelle et de poursuivre l'optimisation des variables du procédé. Le programme en unité-pilote prévoyait également une phase de démonstration, au cours de laquelle on mettrait à l'essai les conditions optimales du traitement dans différentes situations pendant une période de plusieurs mois.

L'unité-pilote a été installée au-dessous du barrage du bassin des résidus de la mine Quirke. L'usine était constituée d'une roulotte de 14 mètres, entièrement fermée, et d'une remorque plate de 11 mètres portant les réacteurs et les floculateurs, le matériel d'approvisionnement en produits chimiques et un clarificateur circulaire. En plus de l'équipement ci-dessus, il y avait un deuxième clarificateur circulaire, un clarificateur rectangulaire à fond incliné et plusieurs filtres à milieu granulaire. La capacité théorique de l'unité-pilote était de 23 l/mn. La figure 3 est une vue en plan de l'unité illustrant l'une des combinaisons essayées au cours du programme.

2.2 Traitement des boues

Les essais de traitement des boues en laboratoire visaient à caractériser les boues obtenues par clarification et filtration et à évaluer leur essorabilité. Cette partie du travail a été effectuée en collaboration avec le Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET) du ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources et comprenait également des boues provenant d'autres procédés en unité-pilote ou à l'échelle réelle. Les renseignements obtenus ont été incorporés à la base de données nécessaire pour choisir les méthodes d'élimination de ces boues. Les résultats de l'étude font l'objet d'un rapport du CANMET (Skeaff et Campbell, 1982) et du Volume III, annexe IV du rapport du programme gouvernement-industrie. Le projet-pilote d'essorage des boues prévu à l'origine dans le cadre du programme général a été retardé en attendant que l'on détermine les différentes possibilités d'élimination de ces boues.



LÉGENDE:

———	EAUX USÉES	PC	CLARIFICATEUR À FOND INCLINÉ
—·—·—	BOUES	CC	CLARIFICATEUR CIRCULAIRE
□	POMPE	F	FILTRE
○	RÉACTEUR DE PRÉCIPITATION	C	RÉSERVOIR DE PRODUIT CHIMIQUE
◎	MÉLANGEUR RAPIDE	S	RÉSERVOIR-TAMPON OU RÉACTEUR DE SECOURS
○	CLARIFICATEUR		
◎	FLOCULATEUR		

FIGURE 3 VUE EN PLAN DE L'USINE-PILOTE

Un deuxième sujet important, la mobilité ou la possibilité d'extraction des éléments radioactifs des boues a fait l'objet d'autres études (Bryant *et al.*, 1979; CEI, 1980; Huck *et al.*, 1982; Huck et Anderson, 1982). La possibilité de stabiliser ou de fixer chimiquement ces boues était un autre sujet intéressant. La documentation sur la stabilisation et la fixation (techniques de solidification) a également été examinée dans le cadre de ce programme, et cet examen figure dans le Volume III à l'annexe IV.

3 RÉSULTATS

3.1 Coprécipitation du baryum et du radium

Que l'effluent final soit clarifié ou filtré, il a subi un traitement préalable qui faisait coprécipiter le baryum et le radium. Le but de l'opération était d'abaisser l'activité du radium-226 dissous dans l'effluent du bassin de retenue des résidus, d'une valeur initiale d'environ 20 à 40 Bq/l (550 à 1100 pCi/l) jusqu'à la valeur cible de 0,11 Bq/l (3 pCi/l).

On a effectué des essais par lots au laboratoire pour connaître les conditions optimales du procédé et pour déterminer la cinétique de la réaction. On a constaté que la coprécipitation dépendait de la dose de chlorure du baryum et du temps de réaction; les résultats étaient optimaux lorsque la dose de baryum était de 16 mg/l (29 mg/l de $BaCl_2 \cdot 2H_2O$) et le temps de réaction de 15 minutes. Apparemment, cette réaction était du premier ordre pendant les 15 premières minutes, et la valeur de l'activité résiduelle du radium-226 dissous était généralement située entre 0,26 et 0,37 Bq/l (7 à 10 pCi/l). Par la suite, l'activité du radium-226 dissous diminuait très lentement.

Les résultats des expériences par lots furent utilisés pour calculer le volume du réacteur nécessaire et sa configuration pour les essais en continu. En se basant sur les premières évaluations, on a retenu deux systèmes en continu en estimant que la cinétique est du premier ordre, que le temps de rétention devait être de 15 minutes et que l'activité du radium-226 dissous devait passer de 37 000 à 0,11 Bq/l (1000 à 3 pCi/l). On a choisi pour les essais un système constitué de deux réacteurs de taille identique montés en série, munis d'agitateurs et alimentés en continu. Le temps de séjour volumétrique total était de 90 minutes, et la dose de baryum utilisée était de 16 mg/l. En 13 jours de fonctionnement, l'appareillage en continu a produit un effluent dont l'activité du radium-226 était en moyenne de 0,37 Bq/l (10 pCi/l). Pour essayer d'améliorer la qualité de l'effluent on a augmenté le nombre de réacteurs en série et le temps de séjour volumétrique total. Pour obtenir une activité moyenne du radium-226 dissous de 0,19 Bq/l (5 pCi/l) il fallait trois réacteurs et un temps de séjour volumétrique total d'au moins 113 minutes. L'objectif de 0,11 Bq/l (3 pCi/l) n'a jamais été atteint pendant ces expériences.

Au cours des essais de développement à l'aide d'une unité-pilote, l'activité du radium-226 dissous dans l'effluent du système de coprécipitation a varié considérablement (figure 4). On suppose que cette variabilité était liée à plusieurs facteurs, notamment les conditions de fonctionnement et les variations saisonnières de température et de composition chimique des eaux usées, mais on n'a pas pu déterminer si les plus grandes variations étaient dues à un facteur particulier. Après les essais de développement, on a estimé nécessaire d'exploiter le système de coprécipitation dans des conditions constantes pendant une période de démonstration d'environ 12 mois, en surveillant les caractéristiques de l'influent et de l'effluent.

Le système choisi pour la phase de démonstration du procédé était constitué de cinq réacteurs en série ayant un temps de séjour volumétrique total de 70 minutes. Ce système était nécessaire pour répondre à la demande hydraulique des unités en aval et représentait l'équivalent théorique du système choisi à l'origine sur la base des résultats des essais en laboratoire (trois réacteurs et 115 minutes). La phase de démonstration a commencé en octobre 1979 (figure 4). Au départ, le système de coprécipitation a bien fonctionné, l'activité du radium-226 dissous étant généralement située entre 0,11 et 0,19 Bq/l (3 et 5 pCi/l). On a constaté une augmentation de l'activité du radium-226 dissous lors de l'élévation de la température de l'effluent des bassins de retenue des résidus. Toutefois, à la mi-juillet 1980, le fonctionnement du système

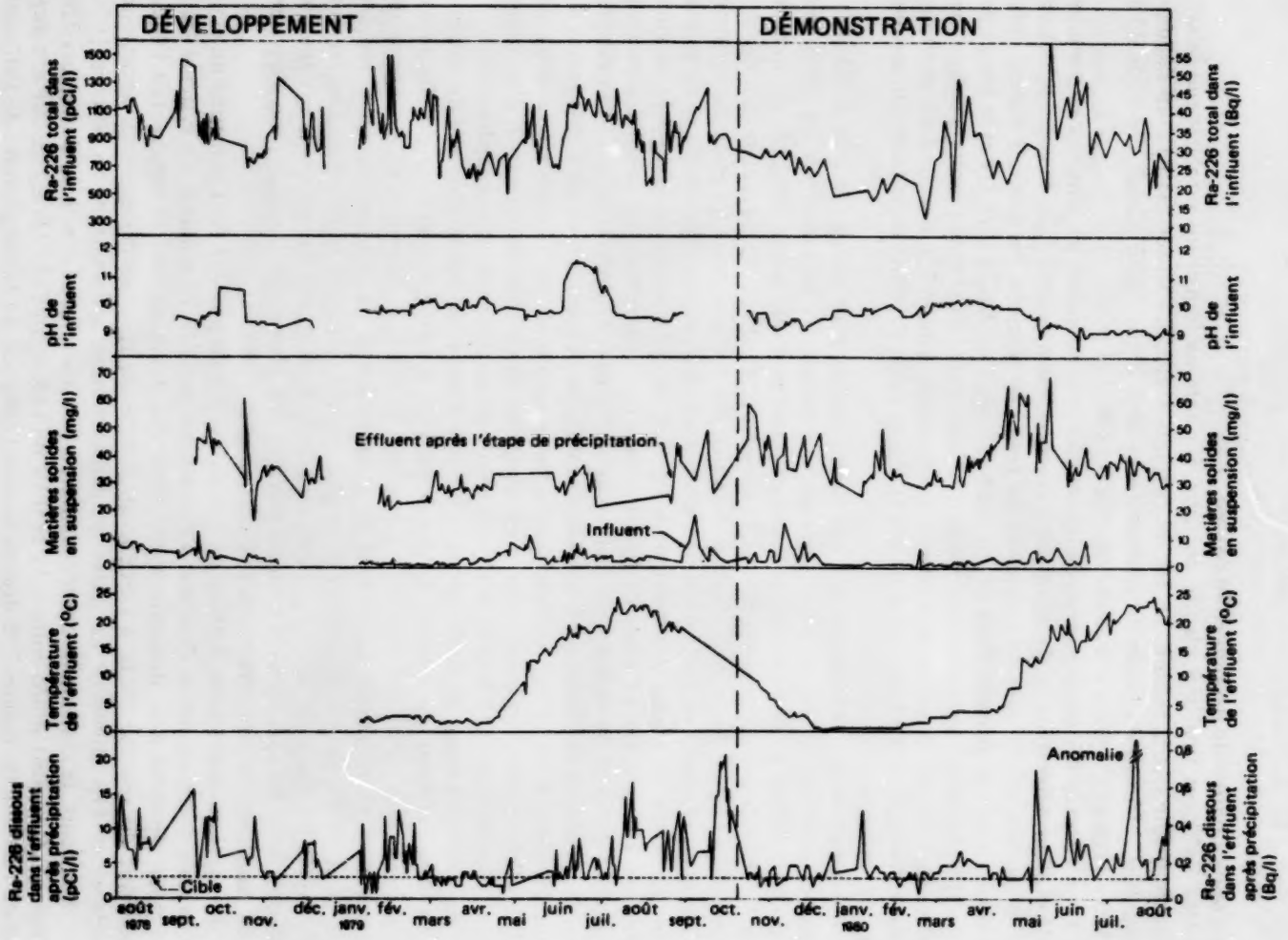


FIGURE 4 PERFORMANCE DU SYSTÈME DE COPRÉCIPITATION DU BARYUM ET DU RADIUM DANS L'UNITÉ-PILOTE

de coprécipitation s'est soudain détérioré gravement et a obligé à réexaminer le problème. On a constaté que l'eau utilisée pour dissoudre et diluer le chlorure de baryum contenait à l'occasion des teneurs excessives en sulfates. Cela provoquait la formation de précipité de sulfate de baryum dans le réservoir de produits chimiques plutôt que dans les réacteurs de coprécipitation, et cela nuisait à la qualité du fonctionnement. On a changé d'approvisionnement en eau, et on a obtenu alors une amélioration de la performance. Les données recueillies au cours de la période de mauvais fonctionnement ont été éliminées du calcul des moyennes. La moyenne de l'activité du radium-226 dissous dans les effluents des cinq réacteurs de coprécipitation, avec un intervalle de confiance de 95 p. 100, est fournie à la figure 5. Les données résumées dans cette figure portent sur la totalité de la phase de démonstration, c'est-à-dire sur 10 mois environ, et excluent les résultats anormaux obtenus au cours d'une période de 10 jours en juillet 1980. Ce graphique représente donc le fonctionnement pour une année complète et illustre la conclusion principale des essais de la coprécipitation: le système a produit un effluent contenant du radium-226 dissous dont l'activité moyenne était de 0,19 Bq/l (5 pCi/l).

3.2 Coagulation, floculation et clarification

Le procédé de clarification devait comprendre les deux opérations suivantes: la coprécipitation du baryum et du radium dans des réacteurs munis d'agitateurs placés en série, l'addition de coagulant chimique dans une unité à mélange rapide, une agitation douce dans des floculateurs mécaniques et une séparation solide-liquide dans un clarificateur. L'objet de la coagulation, de la floculation et de la clarification était de produire un effluent dans lequel l'activité totale du radium-226 serait inférieure ou égale à 0,37 Bq/l (10 pCi/l) en éliminant le précipité de (Ba, Ra)SO_4 formé lors de la coprécipitation.

Même si les travaux de développement à l'aide d'une unité-pilote ont conduit à une augmentation considérable des taux de sédimentation et s'ils nous ont fourni des renseignements très importants sur le comportement des systèmes de coagulation et de floculation, l'objectif de 0,37 Bq/l pour l'activité totale du radium-226 n'a pas toujours été atteint. Les travaux sur la clarification se sont terminés en juin 1980 lors de la phase démonstration du procédé. Les résultats des expériences de clarification ne sont pas commentés dans ce rapport mais sont présentés dans les Volumes II et III.

3.3 Filtration

On a étudié la filtration sur des milieux granulaires pour remplacer la séparation solide-liquide et parvenir à une activité totale du radium-226 de 0,37 Bq/l dans l'effluent. Tous les travaux sur la filtration ont été faits à l'aide d'une unité-pilote en utilisant des colonnes filtrantes d'au moins 10 cm de diamètre.

Le programme d'étude de la filtration comportait l'examen détaillé de plusieurs possibilités, notamment la filtration directe et la coagulation-floculation suivie de filtration, le fonctionnement sous pression par opposition au fonctionnement par gravité, les lits à couche filtrante unique et à filtre bicouche, ainsi que la filtration simple ou avec des adjuvants chimiques. La granulométrie du milieu a été fixée d'après des expériences antérieures. Le milieu filtrant était constitué de sable siliceux, dont les particules avaient un diamètre effectif de 0,4 mm, utilisé soit seul soit en combinaison avec de l'anthracite broyé ayant un diamètre effectif de 1,2 mm. L'épaisseur de milieu filtrant a été fixée de façon arbitraire dans la plage normale utilisée pour les lits de filtration. Pour aider la filtration, on a fait des expériences avec du chlorure ferrique et un polymère anionique en se basant sur des résultats d'essais de floculation.

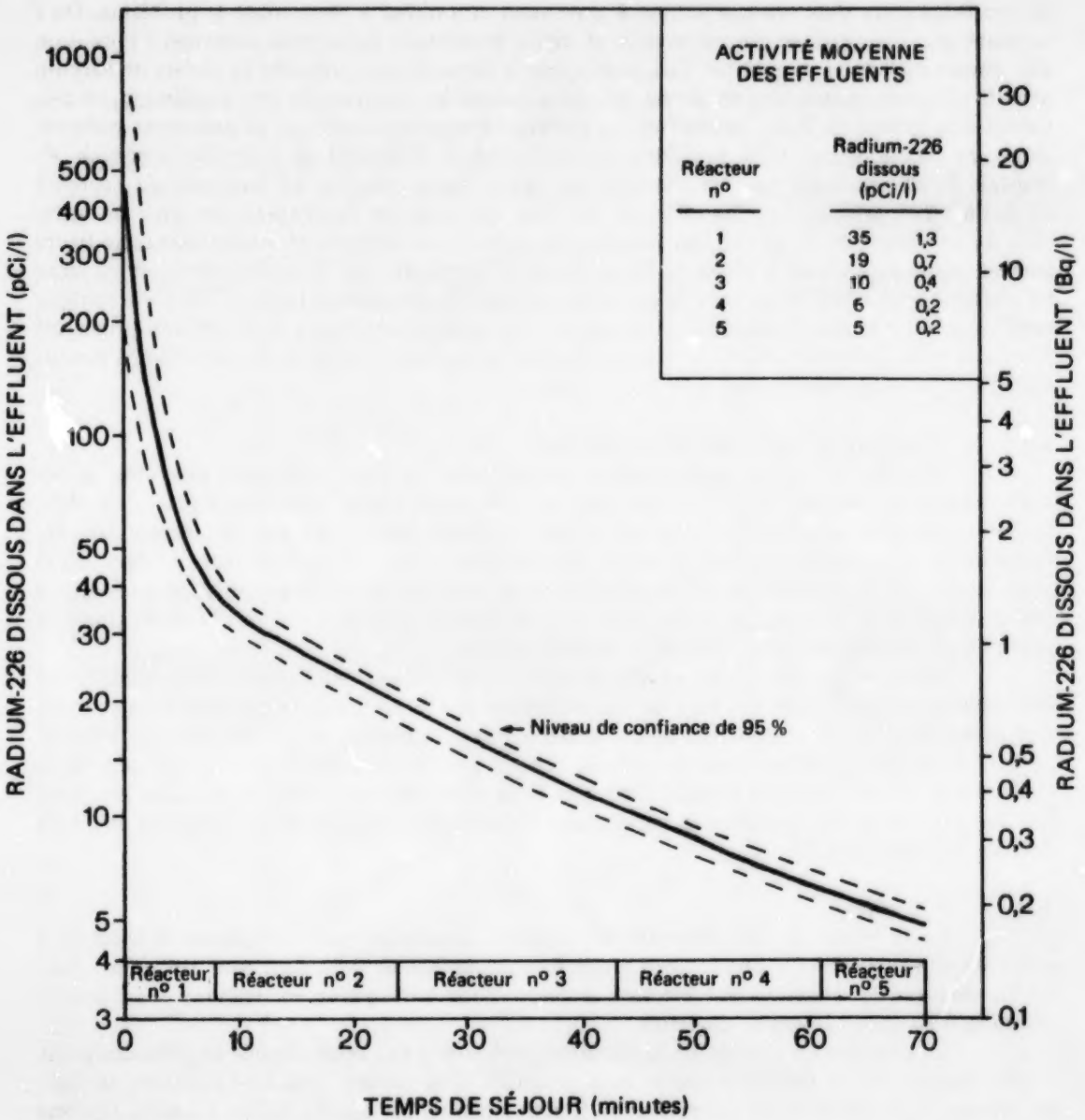


FIGURE 5 PERFORMANCE DE LA COPRÉCIPITATION: PHASE DE DÉMONSTRATION

Les résultats des premières expériences de développement du procédé ont montré que la filtration directe des effluents provenant de la coprécipitation était possible, si l'on utilisait un filtre gravitaire à milieu granulaire et des adjuvants chimiques. Un taux de filtration de 6,5 $l/m^2 \cdot s$ était possible sur un filtre bicouche. Par la suite, les expériences de développement du procédé se sont poursuivies pendant environ cinq mois pour déterminer les problèmes éventuels de conception et de fonctionnement qui ne se seraient pas manifestés lors des essais à court terme au début de l'expérience. Les incertitudes ont été associées à la nécessité de conditionner le lit filtrant au moyen d'un polymère, à la tendance des eaux usées à former des dépôts (notamment de gypse) et à l'efficacité du lavage à contre-courant. Un filtre de 20 cm de diamètre (figure 6) a été utilisé de façon continue pendant environ 165 jours; on surveillait la filtration pendant 24 heures quatre fois par semaine. Les conditions de fonctionnement pour cette période de développement sont résumées au tableau 4. Bien que le fonctionnement du filtre ait été satisfaisant au début, on a constaté une augmentation progressive de la perte de charge initiale et terminale à travers le filtre, au cours des semaines. L'augmentation de la perte de charge était due en partie à des problèmes mécaniques dans la sortie d'eau à la partie inférieure, bien que l'on ait constaté également un important problème de fonctionnement. Il s'agissait du gonflement et du mélange des milieux filtrants que l'on pouvait associer soit à l'augmentation de la perte de charge soit à la mauvaise qualité de l'effluent, en se basant sur les efforts déployés pour stabiliser le lit après le lavage à contre-courant. On pensait que les facteurs contribuant à ce problème étaient l'accumulation de polymères et la formation d'une croûte chimique sur les particules constituant le milieu filtrant. On a essayé le lavage à l'acide, associé à une agitation par courant d'air, car l'on pensait qu'il s'agirait d'une méthode efficace de nettoyage. Toutefois, la fréquence et l'intensité de ces nettoyages restent à établir.

La phase de démonstration du procédé visait à prouver que l'on pouvait obtenir une qualité acceptable de l'effluent pendant une longue période et à identifier la fiabilité du procédé ainsi que les méthodes de nettoyage du milieu filtrant. La démonstration a commencé à la fin de février 1980 et s'est poursuivie jusqu'à la fin de juillet de la même année. Il y a eu deux périodes qui ont toutes les deux commencé par le choix d'une dose adéquate de polymères. Les deux fois on a commencé avec de l'anthracite et du sable frais. Les résultats de la phase de démonstration sont illustrés à la figure 7; on n'y montre cependant que les périodes qui ont fait l'objet d'une surveillance.

Les conditions de fonctionnement choisies pour la première période de démonstration sont résumées au tableau 4. On avait, au départ, établi que l'on pouvait parvenir à une performance adéquate avec une dose en continue de 0,01 mg/l de polymère anionique introduit dans le courant de liquide, sans conditionnement préalable du lit filtrant avec le polymère. Pendant les trois mois suivants, on a obtenu un effluent d'excellente qualité. L'activité totale du radium-226 dans l'effluent sortant du filtre était en moyenne de 0,11 Bq/l (3 pCi/l) et la teneur en matières solides en suspension de 0,4 mg/l en moyenne (filtrations 66 à 113). Le filtre enlevait également du radium-226 dissous. L'activité moyenne du radium-226 dissous qui était de 0,19 Bq/l (5 pCi/l) à la sortie de l'unité de coprécipitation n'était que de 0,07 Bq/l dans l'effluent sortant du filtre. Toutefois, comme le montre la figure 7, la perte de charge à la sortie dépassait la valeur choisie, qui était de 250 cm, pour les filtrations n^{os} 89 à 91. On a pu constater également une expansion progressive du milieu filtrant au cours de la période. Par conséquent, même si le filtre fournissait un effluent de qualité acceptable, sa performance était médiocre, probablement en raison de l'accumulation de polymères de la formation de dépôts chimiques. Le lit du filtre a été lavé avec du chlorure de sodium avant la filtration n^{o} 92 pour essayer d'éliminer les polymères accumulés. La perte de charge montrait que le sel et l'agitation à l'air avaient quelques

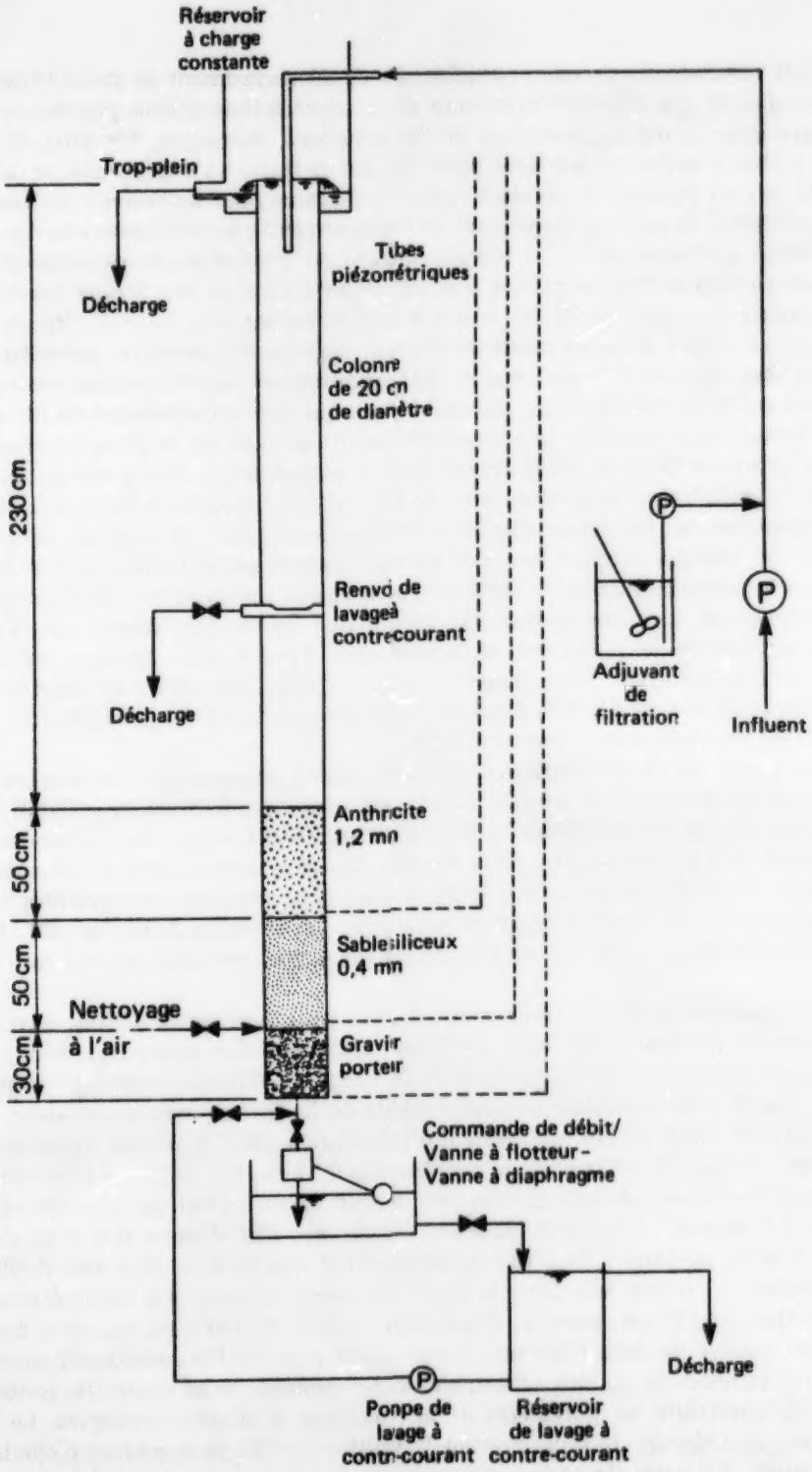


FIGURE 6 FILTRE BICOUCHE

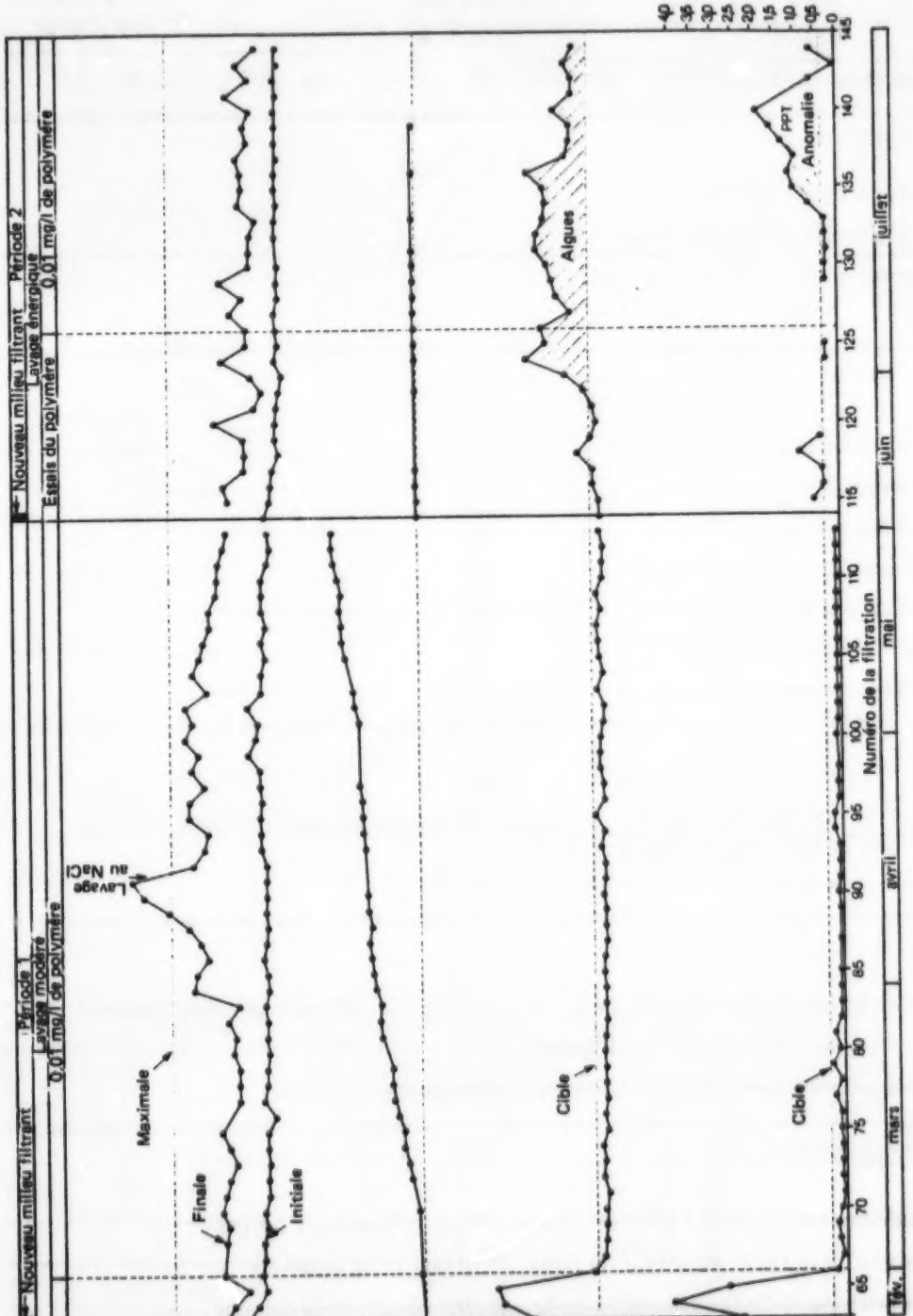
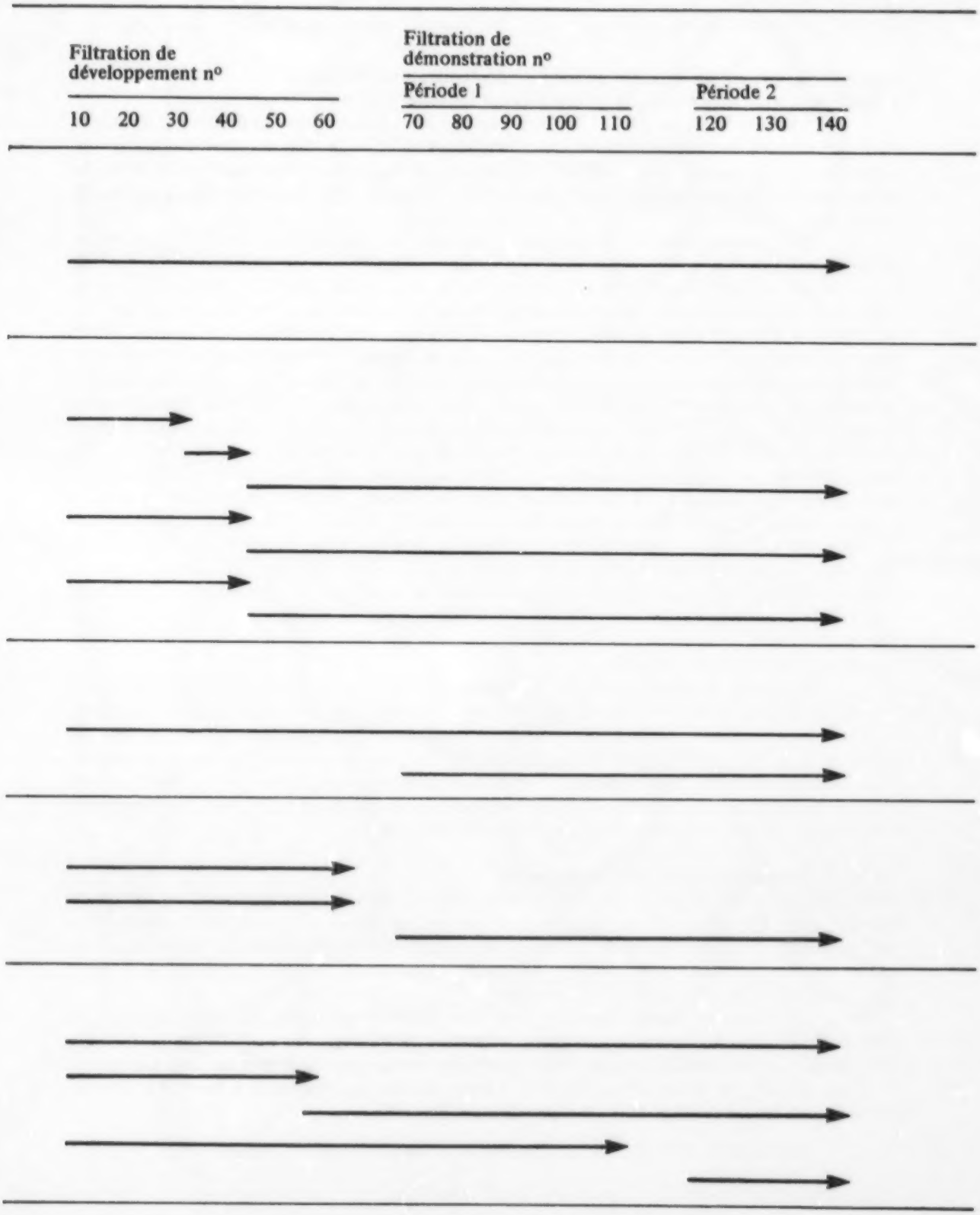


FIGURE 7 RÉSULTATS DES DÉMONSTRATIONS SUR FILTRE BICOUCHE

TABLEAU 4 CONDITIONS D'EXPLOITATION D'UN FILTRE BICOUCHE

Conditions d'exploitation
Appareillage et exploitation
• Filtre gravitaire de 20 cm de diamètre
• Charge hydraulique constante (charge totale ≃ 3,6 m)
• Débit constant de 6,5 $l/m^2 \cdot s$
• Filtrations de 24 h
Lit filtrant
• Charbon, 30 cm d'épaisseur (d.e. = 1,2 mm)*
45 cm d'épaisseur "
50 cm d'épaisseur "
• Sable, 60 cm d'épaisseur (d.e = 0,4 mm)
50 cm d'épaisseur "
• Support, 15 cm d'épaisseur (uniforme)
30 cm d'épaisseur (calibré)
Surveillance
• Perte de charge; taux de filtration; Ra-226 dissous et en suspension dans l'influent; Ra-226 dissous, en suspension et total dans l'effluent
• Épaisseur du lit
Polymère (Percol 727)
• Conditionnement du lit par saturation avec une solution à 1 mg/l de polymère pendant 1 heure
• Dose = 0,01 mg/l pendant 1 heure toutes les 8 heures
= 0,01 mg/l en continu (sauf pendant les essais d'optimisation de la dose)
Lavage à contre-courant
• Maintien d'un gonflement du lit de 1/3 (19 $l/m^2 \cdot s$) jusqu'à ce qu'il paraisse propre
• Sédimentation assistée du lit (arrêt progressif du lavage et vibrage de la colonne)
• Sédimentation non assistée du lit (arrêt soudain du lavage sans vibrage de la colonne)
• Balayage d'air = 1,2 $m^3/m^2 \cdot mn$ (modéré)
6,1 $m^3/m^2 \cdot mn$ (puissant)

* d.e = diamètre effectif (diamètre à partir duquel 10 p. 100 des particules ont un diamètre inférieur à celui-ci).


Filtration de développement n°
10 20 30 40 50 60
Filtration de démonstration n°
Période 1
70 80 90 100 110
Période 2
120 130 140

avantages. Les résultats de cette période de démonstration montraient également que le lavage à l'acide ne devrait être nécessaire qu'une fois par trimestre environ.

Après la filtration n° 113, le filtre a cessé d'être utilisé, et des échantillons d'anthracite et de sable ont été prélevés pour un examen de laboratoire. Les résultats ont montré une accumulation de sels de calcium et de baryum. Les essais par lots avaient démontré que le lavage du milieu filtrant avec une solution de HCl ou de NHO_3 éliminait efficacement la plus grande partie de ces dépôts.

La colonne filtrante a été regarnie et la phase de démonstration a recommencé avec la filtration n° 114. Les conditions de fonctionnement furent les mêmes, sauf que l'on a procédé à un lavage à contre-courant plus énergique dans l'espoir de diminuer l'accumulation de polymères ou de tartre sur les grains du milieu filtrant. Les détails sur le fonctionnement figurent au tableau 4. Pendant cette deuxième période, on a connu deux problèmes sans rapport avec la filtration. Une prolifération d'algues dans le bassin de retenue des résidus était à l'origine de matières en suspension que le filtre granulaire ne retenait pas. Par conséquent le changement de valeur du rapport entre les matières solides et le radium dans l'effluent du filtre a nuit à l'évaluation du fonctionnement de l'unité-pilote, en raison, en particulier, du temps qu'exigeait la mesure du radium-226 et de la nécessité de prendre des décisions de fonctionnement à court terme, en fonction de la seule présence de matières en suspension. Deuxièmement, le problème de la qualité de l'eau servant à dissoudre et diluer les produits chimiques utilisés dans le système de coprécipitation a entraîné des mesures élevées de l'activité totale de radium-226 dans l'effluent du filtre. Ces facteurs ont conduit à des données non représentatives au cours de cette période. Toutefois, les observations sur la perte de charge et la hauteur du lit montrent clairement que la méthode modifiée de lavage à contre-courant a résolu le problème de l'instabilité du lit filtrant. À la fin de la période de démonstration, on ne constatait pas de mélange notable du sable et de l'anthracite, mais un examen microscopique a montré que la formation de tartre sur le milieu n'avait pas été totalement éliminée.

La phase de démonstration a été suivie d'une série d'essais sur la sensibilité du procédé. Une filtration prolongée à raison de 6,5 $l/m^2 \cdot s$ a été effectuée dans des conditions normales de fonctionnement pour obtenir une base de comparaison (figure 8). On a modifié le taux de filtration et la teneur en matières en suspension dans l'influent au cours de filtrations ultérieures. On a alors constaté que le taux de filtration pouvait aller jusqu'à 9,8 $l/m^2 \cdot s$. De plus, on a pu montrer que le filtre était plus sensible aux variations de la charge, et qu'il avait plutôt tendance à se boucher qu'à laisser passer les matières solides ou le radium.

3.4 Caractérisation et essorage des boues

Les boues obtenues par clarification sont constituées principalement de sulfate de baryum, de carbonate de calcium et d'hydroxyde ferrique. Quant aux boues de filtration, elles sont principalement constituées de sulfate de baryum. L'activité spécifique des boues de clarification et de filtration par gramme de masse sèche était respectivement de 377 Bq/g (10 200 pCi/g) et de 1017 Bq/g (27 500 pCi/g).

Les boues de clarification pouvaient être essorées facilement. Le procédé par gel et dégel était celui qui permettait la plus grande réduction de volume, même si la filtration sous vide et la filtration sous pression semblaient des méthodes d'essorage utilisables. Les boues de lavage à contre-courant du procédé de filtration étaient encore plus faciles à essorer; on pouvait atteindre une teneur de 45 p. 100 par sédimentation naturelle.

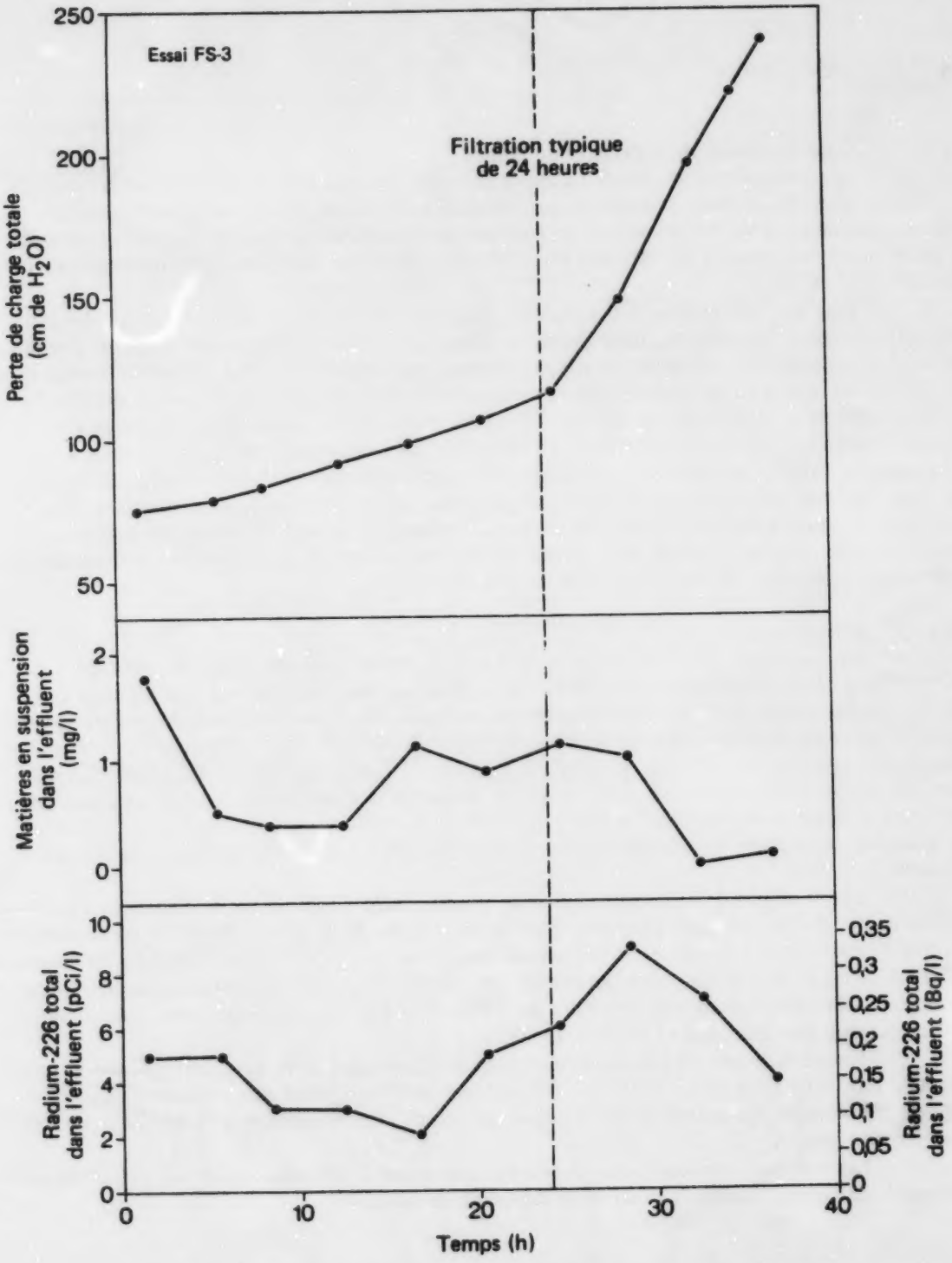


FIGURE 8 PERFORMANCE TYPIQUE D'UN FILTRE BICOUCHE

4 DISCUSSION

4.1 Coprécipitation du baryum et du radium

Les méthodes expérimentales, qui reposent sur les principes de similitude et la méthode d'optimisation des surfaces de réaction, ont conduit à un accord très étroit entre les résultats de laboratoire et ceux de l'unité-pilote. Le système de laboratoire d'essai en continu et celui de l'unité-pilote ont produit un effluent dont l'activité moyenne en radium-226 dissous était de 0,19 Bq/l (5 pCi/l).

L'activité du radium-226 diminuait progressivement au fur et à mesure que les eaux usées traversaient les cinq réacteurs en séries. Même si la différence constatée au cours des dix mois était significative du point de vue statistique, nous avons considéré qu'une différence de 0,04 Bq/l (1 pCi/l) entre le quatrième et le cinquième réacteur ne justifient pas ce dernier. Par conséquent, on a sélectionné un système à quatre réacteurs de même taille, placés en série et ayant chacun un temps de séjour de 15 minutes. La performance de ce système à quatre réacteurs, et celle de systèmes à trois ou cinq réacteurs, a été prévue en utilisant des données sur le taux de réaction obtenues grâce à l'unité-pilote. Les autres systèmes proposés devraient conduire à une activité du radium-226 dissous d'environ 0,22 Bq/l. Ce niveau de performance pourrait être obtenu à n'importe quelle échelle, à condition de conserver une similarité géométrique, dynamique et chimique avec le système pilote.

4.2 Filtration

On considère que l'utilité de la filtration a été prouvée au cours des deux périodes d'essai de la phase de démonstration. Pendant la première période, le filtre a produit un effluent de très bonne qualité, à un taux de filtration qui est considéré comme réalisable des points de vue techniques et économiques. Le problème de l'instabilité du lit filtrant (gonflement et mélange) que l'on a constaté au cours de la première période de fonctionnement a été résolu plus tard par un lavage à contre-courant plus énergique. Malheureusement, deux facteurs extérieurs, la présence d'algues dans l'influent et des perturbations du système de coprécipitation, ont limité la quantité de données significatives sur les effluents qu'on a pu recueillir lors de la deuxième période.

Les systèmes de filtration réels sont normalement conçus à partir d'études en unité-pilote composée de colonnes filtrantes d'au moins 10 cm de diamètre. Même si les modèles-pilotes de cette dimension ne sont pas satisfaisants pour représenter la performance du lavage (USEPA, 1975), leur performance représente raisonnablement bien la performance des filtres grandeur réelle. Par conséquent la qualité de la filtration que l'on a obtenue avec l'unité-pilote devrait pouvoir être reproduite à l'échelle réelle.

Toutefois, étant donné que le nettoyage du filtre peut constituer un problème et que l'unité-pilote était trop petite pour que son système de lavage puisse être considéré comme un modèle raisonnable, les spécifications relatives au lavage et au nettoyage à l'acide ne devraient pas être trop strictes.

La base de données pour concevoir une usine à l'échelle réelle est présentée au tableau 5. La figure 9 illustre le procédé de façon schématique.

TABLEAU 5 BASE DE DONNÉES POUR LA CONCEPTION D'UNE INSTALLATION

Coprécipitation du baryum et du radium	Dose de baryum*	16 mg/l de Ba
	Réacteurs de précipitation: (systèmes possibles) Nombre de réacteurs en série et temps de séjour	3 @ 26,7 = 80 mn 4 @ 15,0 = 60 mn 5 @ 11,0 = 55 mn
	Énergie nécessaire	6×10^{-2} kW/m^3
Filtration sur milieu granulaire	Dose d'adjuvant**	0,01 mg/l
	Taux de filtration: théorique maximale	6,5 l/m^2 · s 9,8 l/m^2 · s
	Épaisseur du lit: anthracite sable	0,5 m 0,5 m
	Caractéristiques de l'anthracite – diamètre effectif – coefficient d'uniformité – diamètre maximal	 1,2 mm 1,6 4,8 mm
	Caractéristiques du sable siliceux – diamètre effectif – coefficient d'uniformité – diamètre maximal	 0,4 mm 1,6 1,2 mm

* Le baryum doit être sous une forme utilisable, c'est-à-dire dissous. S'il y a des ions sulfate dans l'eau d'appoint des produits chimiques, le baryum précipitera, et il en résultera une baisse d'efficacité.

** Écoulement continu d'un polymère anionique de masse molaire élevée; le type de polymère et la dose optimale peuvent dépendre de l'endroit.

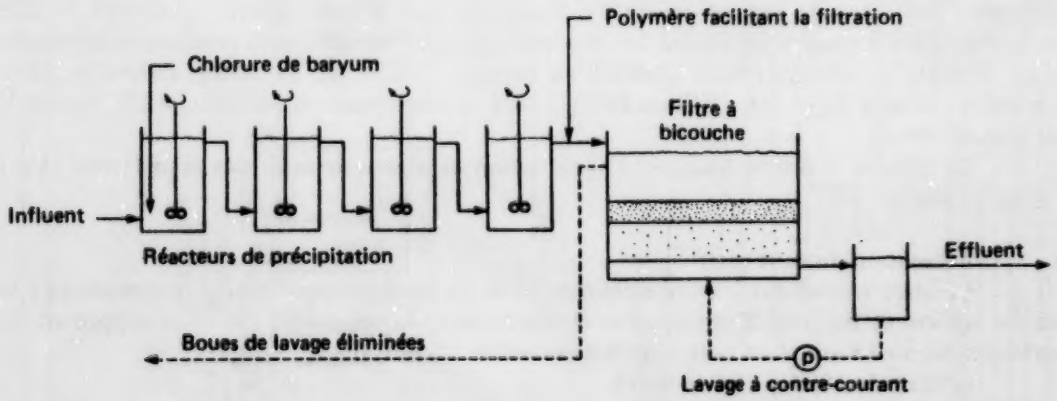


FIGURE 9 PROCÉDÉ D'ÉLIMINATION DU RADIUM-226

5 ÉVALUATION DES COÛTS

Les investissements et les frais d'exploitation et d'entretien ont été estimés pour trois usines de coprécipitation et de filtration du baryum et du radium à l'échelle réelle. Les débits sélectionnés pour ces trois usines étaient de 380, 150 et 26 l/s.

Pour commencer notre évaluation, nous avons préparé une base de données d'estimation des coûts à partir du tableau 5, en y ajoutant tout le matériel auxiliaire nécessaire pour rendre une usine de traitement fonctionnelle. La base de données ainsi obtenue et les observations supplémentaires sur la conception figurent dans les Volumes II et III. Le diagramme du procédé ainsi que celui des instruments de mesure et de contrôle ont été préparés parallèlement à la base de données d'estimation des coûts (figures 10 et 11). On a préparé des plans pour chacune des trois usines; la figure 12 représente la plus grande des trois. On a envisagé deux options pour le traitement des boues:

– L'option I prévoit l'épaississement par lot des boues de lavage comme étant une étape en vue de leur élimination définitive selon une technique non encore choisie.

– L'option II prévoit le transport des boues de lavage; sous forme semi-liquide, vers le bassin de retenue des résidus.

5.1 Évaluation des investissements

L'évaluation des investissements a été préparée par des ingénieurs-conseils expérimentés dans le domaine de la conception et de la construction d'usines de traitement des eaux usées (MacLaren, 1981). Les prix de l'équipement proviennent des fournisseurs et étaient ceux en vigueur en mars 1981. Les coûts de préparation du terrain et de construction sont basés sur ceux de la région d'Elliot Lake.

Les investissements pour l'usine de 380 l/s sont résumés au tableau 6.

5.2 Estimation des frais d'exploitation et d'entretien

L'estimation des frais d'exploitation et d'entretien (E&E) a été faite au Centre technique des eaux usées. Elle est basée sur des données publiées pour les usines de traitement des eaux (Gumerman *et al.*, 1978; Patterson et Banker, 1971). Ces valeurs publiées ont été actualisées au printemps 1981. Pour la main-d'oeuvre, on a supposé que le coût salarial total était de 20$ l'heure. Par ailleurs nous avons utilisé les prix suivants pour les différents produits consommés: énergie, 3 cents le kilowatt-heure; chlorure de baryum, 20$ le sac de 50 kg; polymère, 5$ le kilogramme; acide à 60 p. 100 (HCl ou HNO_3), 77$ le mètre cube. Voir Volume III, annexe V pour plus de détails.

Le tableau 7 donne les frais d'exploitation et d'entretien calculés pour l'usine ayant un débit de 380 l/s.

5.3 Estimation du coût total

Le coût annuel total a été estimé en utilisant les investissements correspondants à la première option et les frais d'exploitation et d'entretien (au printemps 1981) en supposant un amortissement sur 15 ans et un taux d'intérêt annuel de 15 p. 100:

- usine de 380 l/s 1 046 400 $
- usine de 150 l/s 710 200 $
- usine de 26 l/s 401 400 $

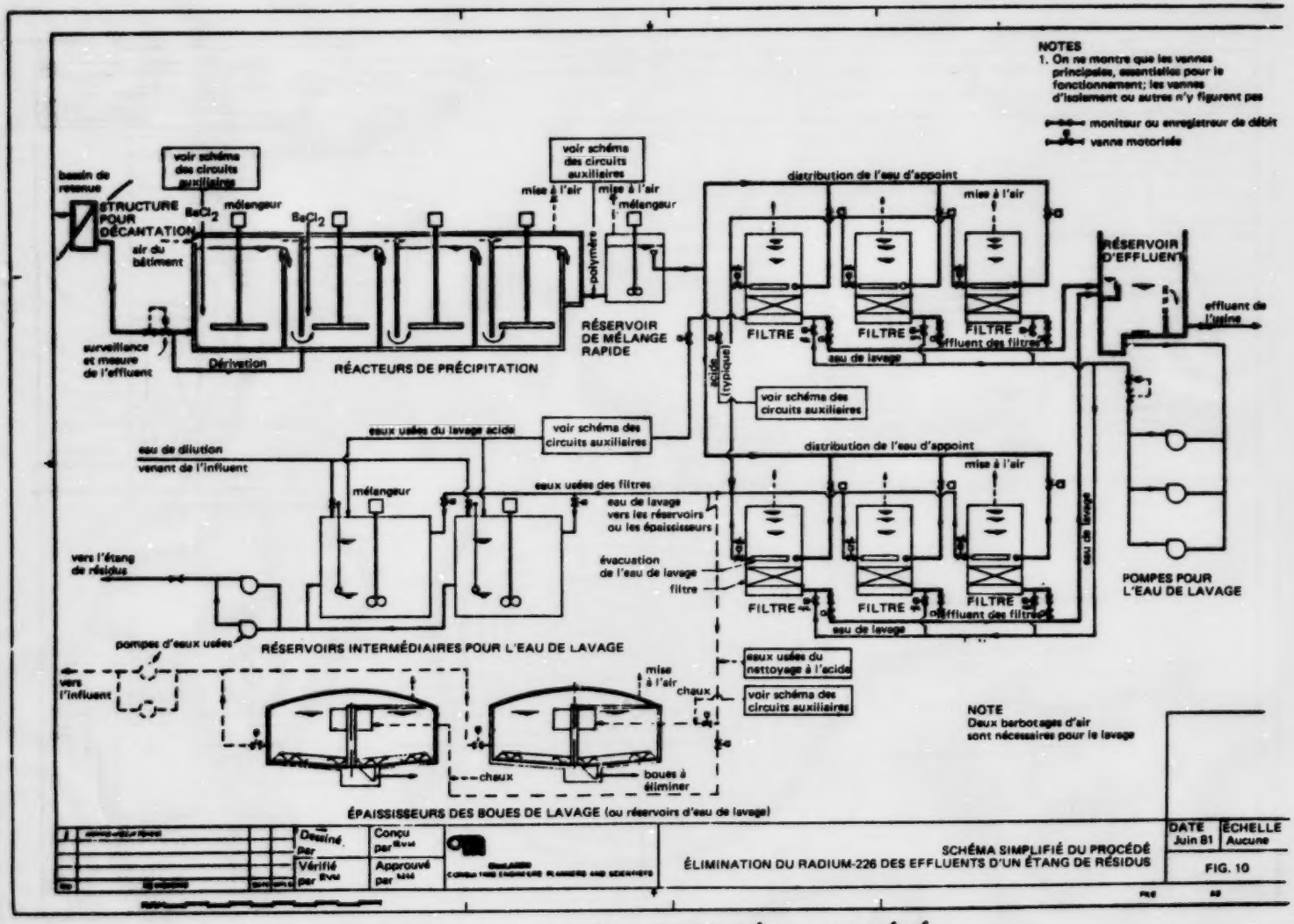


FIGURE 10 SCHÉMA SIMPLIFIÉ DU PROCÉDÉ

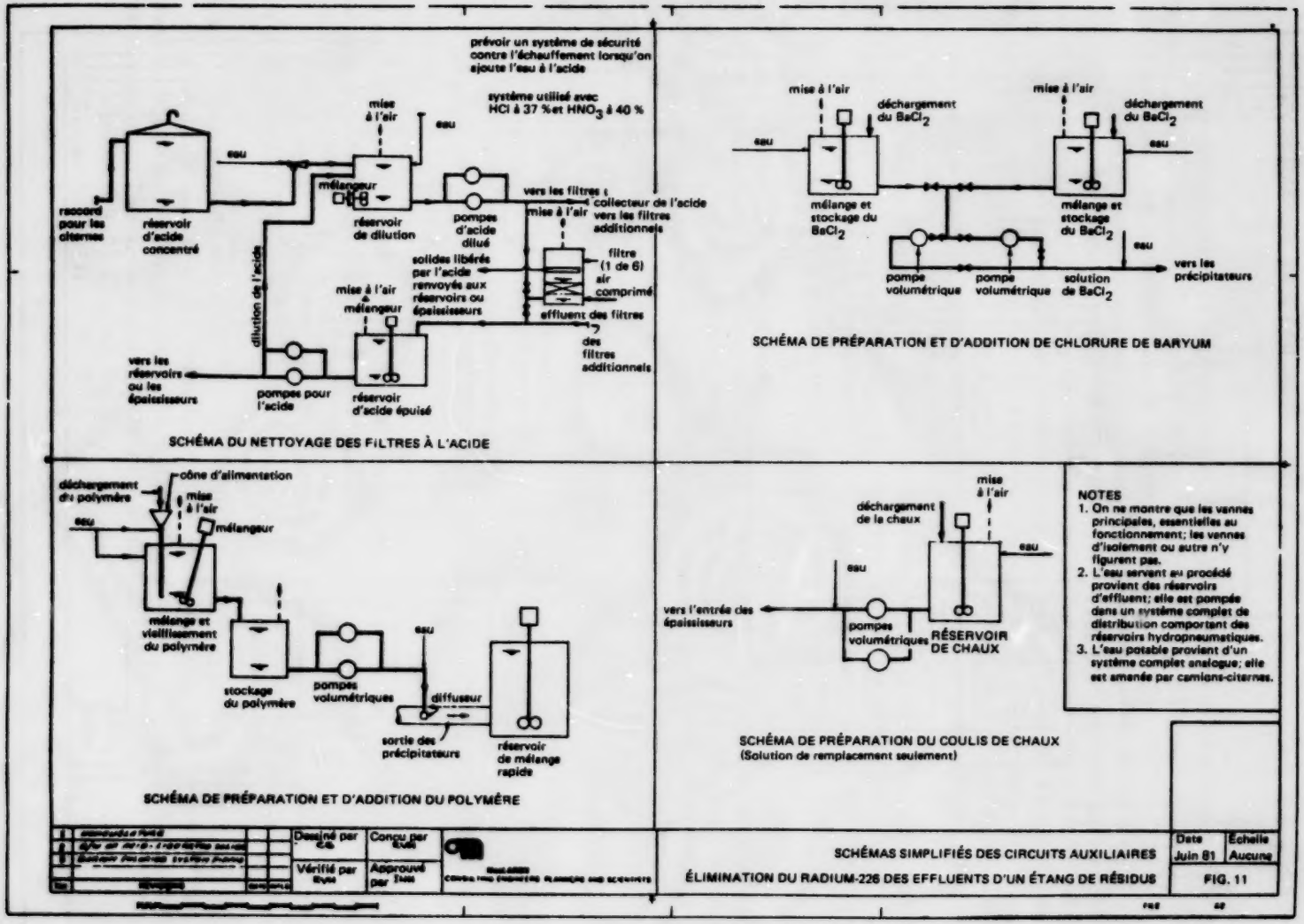
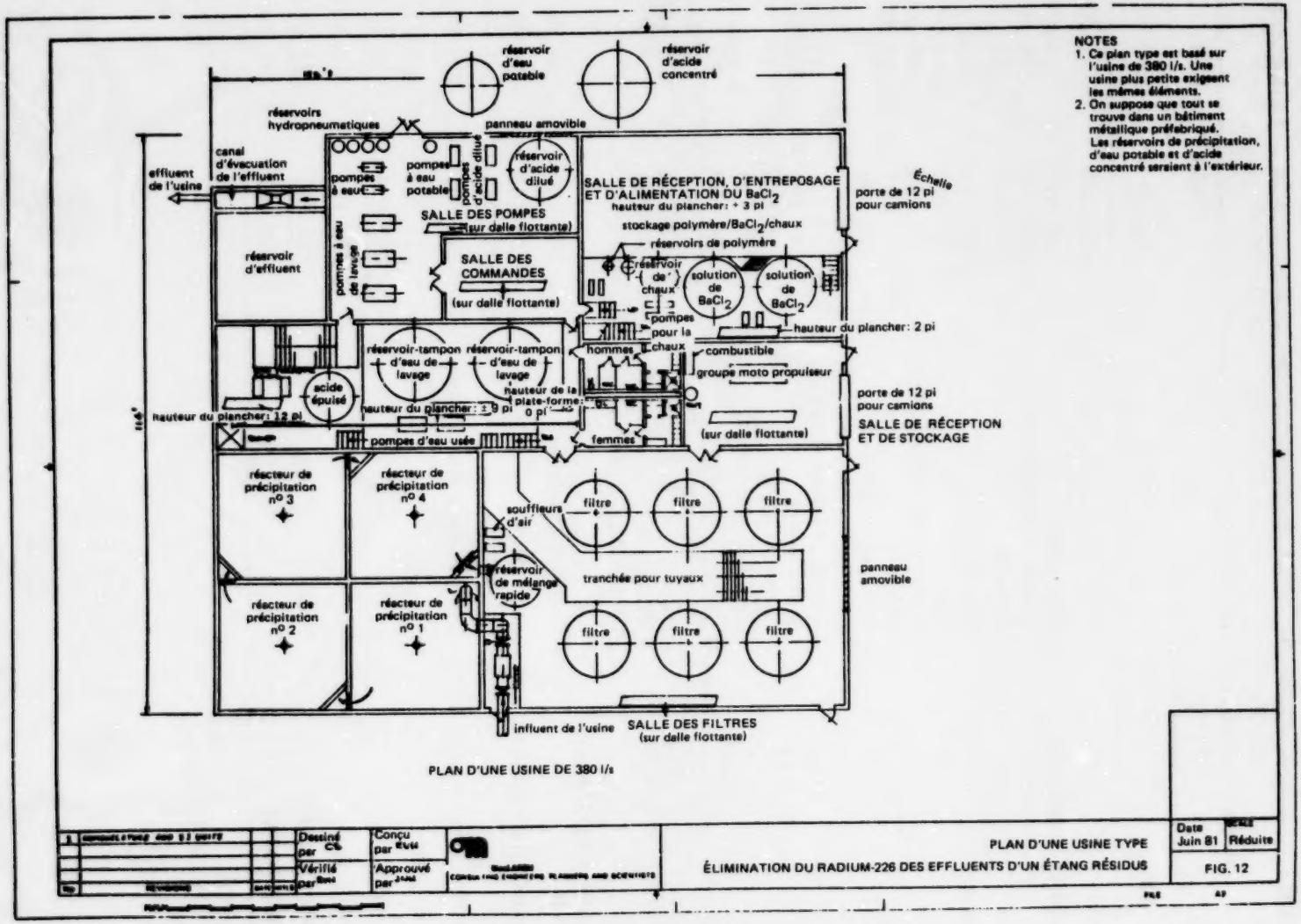


FIGURE 11 SCHÉMAS SIMPLIFIÉS DES CIRCUITS AUXILIAIRES



PLAN D'UNE USINE DE 380 l/s

FIGURE 12 PLAN D'UNE USINE TYPE

TABLEAU 6 RÉSUMÉ DE L'ESTIMATION DES INVESTISSEMENTS – USINE DE 380 l/s

Article	Détail	Coûts ($ de 1981) Option I	Option II
Bâtiments	– Structure et architecture	622 000	622 000
Services du bâtiment	– Plomberie	66 650	66 650
	– Chauffage, ventilation	108 200	108 200
	– Éclairage	83 000	83 000
Procédé	– Précipitation	445 116	445 116
	– Réacteurs	17 025	17 025
	– Réservoirs de mélange de l'acide	406 200	406 200
	– Filtres (6)	13 025	13 025
	– Stockage de l'effluent	70 550	
	– Épaississeurs des boues		47 110
	– Réservoirs intermédiaire pour le lavage	51 490	51 490
	– Circuit du $BaCl_2$	20 120	20 120
	– Circuit du polymère	11 295	
	– Circuit de la chaux	44 655	44 655
	– Circuit de l'acide	12 375	12 375
	– Pompes	8 100	8 100
	– Mélangeurs	449 200	449 200
	– Canalisations et vannes		
Équipement mécanique divers	– Chargeuse, générateur	108 000	108 000
Équipement électrique	– Sous-station	70 000	70 000
	– Câblage	321 550	321 550
Instruments de mesure	– Composants, panneaux, etc.	286 800	286 800
Total partiel		3 215 351	3 180 616
Imprévu	20 %	643 070	636 123
Total partiel		3 858 421	3 816 739
Frais d'ingénierie	10 %	385 842	381 674
COÛT TOTAL		4 244 263	4 198 841

TABLEAU 7 RÉSUMÉ DE L'ESTIMATION DES FRAIS D'EXPLOITATION ET D'ENTRETIEN – USINE DE 380 l/s

Article	Frais E&E (en milliers de dollars par année) (printemps 1981)
PRÉCIPITATION	
– énergie	18,2
– $BaCl_2$	136,0
FILTRATION	
– énergie	1,8
– pièces	5,4
– polymère	0,6
– acide	6,1
– main-d'oeuvre	110,0
BOUES	
– pompage	3,5
– main-d'oeuvre	28,0
– épaississeurs et réservoirs intermédiaires	11,0
TOTAL	320,6

6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusions

Si l'on considère le tableau 2, on voi que les objectifs 1, 2 et 3 ont été atteints. On a pu mettre au point un procédé physico-chimique de traitement des eaux usées et démontré à l'échelle-pilote que l'on pouvait produire un effluent respectant l'objectif du programme qui avait été fixé à 0,37 Bq/l (10 pCi/l) pour le radium-226 total et 0,11 Bq/l (3 pCi/l) pour le radium-226 dissous. Les principales spécifications de l'usine figurent au tableau 5. Les objectifs 4 et 5 n'ont été atteints qu'en partie; les expériences de caractérisation et d'essorage des boues ont été faites en laboratoire dans le cadre d'un programme limité. Les essais d'essorage des boues dans une unité-pilote dépassent le cadre du présent progamme, étant donné que d'autres doivent prendre incessamment des décisions concernant les différentes méthodes d'élimination des boues. L'objectif 6 a été atteint en partie, en ce sens que les investissements et les frais d'exploitation et d'entretien ont été estimés pour le traitement des eaux usées dans des usines de différentes tailles.

Les principaux facteurs de la *coprécipitation du baryum et du radium* étaient la dose de baryum et le temps de séjour dans le réacteur. On a pas pu atteindre de façon continue l'objectif de 0,11 Bq/l (3 pCi/l) dans le système de réacteurs de coprécipitation. En unité-pilote, on a pu atteindre une activité moyenne du radium-226 dissous de 0,19 Bq/l (5 pCi/l). Les différentes configurations recommandées devraient permetre d'obtenir une activité de radium-226 dissous d'environ 0,22 Bq/l (6 pCi/l).

La séparation solide/liquide a été obtenue par filtration sur un milieu granulaire de l'effluent de coprécipitation. Nous avons procédé à une filtration par gravité sur un filtre bicouche, à un taux de 6,5 $l/m^2 \cdot s$, en utilisant un polymère anionique de masse molaire élevée pour faciliter la filtration. On a pu ainsi obtenir un effluent ayant une activité en radium-226 total inférieure à l'objectif de 0,37 Bq/l (10 pCi/l) et une activité en radium-226 dissous inférieure à l'objectif de 0,11 Bq/l (3 pCi/l). Les filtres peuvent se boucher, mais ils ne laissent pas passer les matières solides ou le radium; par conséquent il est possible de maintenir une qualité constante de l'effluent.

Nous avons constaté que le *nettoyage du filtre* était un élément extrêmement important, bien que la taille du matériel utilisé dans l'unité-pilote n'ait pas permis une quantification précise du nettoyage. Le lavage à contre-courant, associé avec un barbotage d'air, était nécessaire toutes les 24 heures environ dans les conditions normales. Un lavage beaucoup plus énergique permettait de résoudre le problème de l'instabilité du lit (mélange des milieux et gonflement du lit) mais n'éliminait pas l'accumulation de tartre sur le milieu et les autres surfaces du filtre. Des lavages périodiques à l'acide, nitrique ou chlorhydrique, à 2 p. 100 (V/V) étaient nécessaires pour éliminer le tartre. Le lavage à l'acide ne devait pas être nécessaire plus de quatre fois par an.

Les *boues* de lavage du filtre étaient constituées principalement de sulfate de baryum et avaient une activité spécifique d'environ 10^7 Bq (27 500 pCi) par gramme de matière sèche. Les essais en laboratoire montrent que ces boues étaient faciles à essorer.

6.2 Recommandations

Un prototype d'usine, comportant une phase de coprécipitation et une phase de filtration, a été construit à la mine d'uranium Sanleigh à Elliot Lake (Ontario) par Rio Algom Limited. Nous recommandons une surveillance étroite durant les deux ou trois premières années de fonctionnement.

Des études expérimentales supplémentaires sont nécessaires pour obtenir une meilleure compréhension des mécanismes physico-chimiques du procédé et pour évaluer d'autres procédés possibles. Bien que ce travail soit important, nous estimons qu'il dépasse l'objectif de ce programme, et nous recommandons des études supplémentaires.

BIBLIOGRAPHIE

Bryant, D.N., D.B. Cohen et R.W. Durham, *La percolation des constituants radioactifs de stériles de mines d'uranium. Rapport provisoire (juin 1974 - janvier 1977)*, Service de la protection de l'environnement, rapport EPS 4-WP-79-4F, Environnement Canada, Ottawa, 1981.

Gumerman, R.C., R.L. Culp et S.P. Hansen, *Estimating Costs for Water Treatment as a Function of Size and Treatment Plant Efficiency*, United States Environmental Protection Agency, Report No. EPS-600/2-78-182, 1978.

Huck, P.M. et B. Anderson, "Leachability of barium-radium sulphate sludges", présenté à la 37th Annual Purdue Industrial Waste Conference, West Lafayette, Indiana, mai 1982.

Huck, P.M., J.R. Brown, G. Multamaki et K.L. Murphy, "Environmental consequences of the placement of radium-barium sludge in tailings areas", *CIM Bulletin*, vol. 75, nº 839, p. 147-193, 1982.

IEC, International Environmental Consultants Limited, "Placement of Barium-Radium Sludge in Tailings Areas", Atomic Energy Control Board, Report INFO 0019, Ottawa, Canada, 1980.

International Atomic Energy Agency (IAEA), *Management of Wastes from the Mining and Milling of Uranium and Thorium Ores*, Safety Series No. 44, IAEA, Vienne, Autriche, 1976.

MacLaren Engineers Planners and Scientists Inc., "Engineering cost estimate for treatment facilities for removal of Radium-226 from uranium mining and milling effluents", rapport au ministère des Approvisionnements et Services et au Service de protection de l'environnement, mai, 1981.

Patterson, W.L. et R.F. Banker, *Estimating Costs and Manpower Requirements for Conventional Wastewater Treatment Facilities*, United States Environmental Protection Agency, Report No. 17090 DAN 10/71, 1971.

Radioactivity Sub-group, *Report of Radioactivity Sub-group to the Mining Task Force for the Development of Effluent Guidelines and Regulations for the Canadian Mining Industry*, Environnement Canada, 23 juillet, 1974.

Skeaff, J.M. et H.W. Campbell, "Physical, Chemical and Dewatering Characteristics of Ba/Ra SO_4, Sludges for Uranium Milling", Énergie, Mines et Ressources Canada, CANMET, rapport MRP/MSL 80-7(TR), Ottawa, Ontario, 1982.

United States Environmental Protection Agency (U.S.E.P.A.), *Process Design Manual for Suspended Solids Removal*, EPA 625/1-75-003a, janvier, 1975.

Wilkinson, P. et D.B. Cohen, "The optimization of filtered and unfiltered ^{226}Ra removal from uranium mining effluents, Status Report (1976-1977)", *Proceedings of the 226 Radium Workshop*, 17 octobre 1977, édité par H.H. McCreedy et W.H. Smith, Énergie, Mines et Ressources Canada, CANMET, Ottawa, Canada, rapport ERP/MSL 80-14(TR), janvier, 1980.